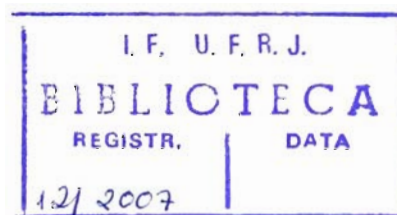


Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
A DINÂMICA DO MOVIMENTO CIRCULAR
(UMA PROPOSTA PARA O ENSINO MÉDIO)

Aluno: Rodrigo Corrêa de Sá e Benevides
Orientadora: Penha Maria Cardoso Dias
Co-Orientadora: Wilma Machado Soares Santos

Junho de 2007



Resumo

Este trabalho apresenta uma proposta para introduzir o movimento circular para o aluno do Ensino Médio. O foco é colocado na dinâmica e não na cinemática, como abordado usualmente nos livros de Ensino Médio. Foi elaborado material didático envolvendo uma demonstração, um experimento e textos didáticos de História da Física: nos textos de História, são apresentados os problemas que levaram à formulação dos conceitos. Um pressuposto metodológico é que a História da Física é um bom organizador prévio no processo de ensino-aprendizagem, segundo a teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. A História viabiliza, também, a compreensão da ciência como construção humana e o reconhecimento do sentido histórico da ciência, atendendo a necessidade de contextualização no ensino de Ciências, requerida pelos Parâmetros Curriculares Nacionais. Planos de aula descrevendo a aplicação para alunos da 1ª série do Ensino Médio do Colégio Pedro II são apresentados com detalhes.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Professora Penha Maria Cardozo Dias pela oportunidade de compartilhar o conhecimento e a percepção da riqueza da História da Ciência na compreensão da Física. À Professora Wilma Machado Soares Santos, pela oportunidade de aprender a aplicar corretamente (e aprofundar) os conceitos no Ensino de Física e ao Professor Octávio Ferreira Filho, do Colégio Pedro II, pelo apoio na aplicação do material desenvolvido.

Agradeço aos professores do Instituto de Física, pelo incentivo e convicção de que o ensino científico é indispensável para nosso país. À Universidade Federal do Rio de Janeiro, por proporcionar os meios para que os objetivos acima fossem atingidos.

Finalmente, agradeço a minha mulher e a meus pais, sem os quais eu não chegaria até aqui.

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	2
	INTRODUÇÃO	2
2	APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA	4
2.1	CONDIÇÕES PARA O APRENDIZADO	4
2.2	SUBSUNÇORES	5
2.3	ORGANIZADORES PRÉVIOS	6
2.4	MAPAS CONCEITUAIS	6
3	PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO	8
3.1	METODOLOGIA	8
3.2	ESTRUTURA E APLICAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS	8
3.3	PROPOSTA DIDÁTICA	10
4	MATERIAL DIDÁTICO I: EXPERIMENTOS	11
4.1	EXPERIMENTO 1: BORRACHA GIRATÓRIA	11
4.2	EXPERIMENTO 2: GARRAFA FLUTUADORA	13
5	MATERIAL DIDÁTICO II: HISTÓRIA DA FÍSICA COMO ORGANIZADOR PRÉVIO	15
5.1	TEXTO 1: OBSERVANDO (PACIENTEMENTE) O MOVIMENTO DAS ES- TRELAS	15
5.1.1	ARISTÓTELES E O MOVIMENTO DAS ESTRELAS	17
5.1.2	A BUSCA DA PERFEIÇÃO ATRAVÉS DO MOVIMENTO CIRCU- LAR: A EXPLICAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DOS CORPOS CELESTES	18

5.2	TEXTO 2: O DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA	20
5.2.1	A “DINÂMICA” DE ARISTÓTELES	20
5.2.2	GALILEU E O MOVIMENTO DOS CORPOS	21
5.2.3	O PRINCÍPIO DA INÉRCIA	22
5.2.4	DESCARTES E O MOVIMENTO CIRCULAR	24
5.2.5	A DINÂMICA DO MOVIMENTO CIRCULAR	26
6	MATERIAL DIDÁTICO III: ATIVIDADES DE FIXAÇÃO	29
6.1	ATIVIDADE 1: OPERAÇÃO LARANJA NA CAMISA	29
6.1.1	Folha de Exercícios: Operação Laranja na Camisa	30
6.2	ATIVIDADE 2: ESTRELAS MÓVEIS	30
6.2.1	Folha de Exercícios: Um modelo para explicar o caminho das estrelas móveis	31
7	PLANOS DE AULA	33
7.1	PRIMEIRA AULA	33
7.2	SEGUNDA AULA	35
7.3	TERCEIRA AULA	37
8	RESULTADOS	40
8.1	RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS	41
8.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho foi motivado por dois aspectos relativos ao ensino do movimento circular em um plano, sendo um de caráter geral e outro relativo às dificuldades do estudante do Ensino Médio com o tema.

O primeiro diz respeito ao fato de que, ao se ensinar o movimento circular, algumas características importantes do fenômeno não são, em geral, bem desenvolvidas:

1. Apresentação clara do relacionamento entre o movimento circular uniforme e as leis de Newton, ressaltando o fato de que se trata de um movimento acelerado cuja causa tem a mesma natureza de um movimento retilíneo acelerado.
2. A consideração da noção de tendência centrífuga, que muitos alunos já trazem consigo, como conhecimento prévio relevante, inclusive do ponto de vista histórico, para se chegar ao conceito de força centrípeta.
3. Um desenvolvimento mais claro, tanto do ponto de vista conceitual quanto da origem histórica da lei $\frac{v^2}{R}$, feita tradicionalmente através de considerações cinemáticas.
4. A importância do movimento circular no desenvolvimento do conhecimento sobre as leis da Dinâmica.

As dificuldades encontradas no ensino médio constituem a segunda motivação deste trabalho:

1. Deficiência na estruturação de diversos conceitos anteriores de Dinâmica:

- (a) Conhecimentos básicos de cinemática escalar: velocidade e aceleração como taxas de variação de outras grandezas.
 - (b) Conhecimentos básicos de cinemática vetorial: conceituação e operação com grandezas vetoriais; velocidade e aceleração como taxas de variação (módulo, direção e sentido) de outras grandezas vetoriais.
2. Conceitos básicos relacionados à 1ª e 2ª leis de Newton, tais como inércia no movimento retilíneo; correta identificação das forças atuantes nos corpos, condições de equilíbrio e aplicação da relação $F = ma$.
 3. Confusão entre tendência centrífuga, força centrípeta e forças em referenciais não-inerciais.
 4. Dificuldade em identificar situações concretas do cotidiano, envolvendo movimento circular tal como apresentado em sala de aula.
 5. Dificuldade em abstrair, nessas ocorrências do cotidiano, a situação teórica desenvolvida, em função das simplificações usuais feitas na abordagem do conteúdo (modelo de ponto material, ausência de resistência dos meios e aproximações de condições de equilíbrio).

Para fazer face a essas dificuldades, apresento uma introdução ao movimento circular, para ser usada em sala de aula, no Ensino Médio como proposto pelos Parâmetros Curriculares Nacionais[1]. A metodologia tem como suporte a Teoria da Aprendizagem Significativa apresentada no capítulo 2. A História da Física é proposta como um elemento dessa metodologia, a saber, funciona como um organizador prévio; a característica da História que é enfatizada é a análise de questões e soluções de problemas que levaram à formação da Física.

O capítulo 2 um breve sumário da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel e seus principais elementos. No capítulo 3 é explicada a metodologia, a utilização de questionários de levantamento de conhecimentos prévios e a proposta didática do trabalho. Os capítulos 4 e 5 descrevem o material didático desenvolvido, que inclui experimentos e textos de História da Física. No capítulo 6 ^{5a} são apresentados os planos de aulas, revelando como foi feita a aplicação dos materiais didáticos, seguidos pelos resultados dos questionários e suas respectivas análises (capítulo 7). Finalmente ^{6a} apresentada no apêndice uma proposta de mapa conceitual para fora.

Capítulo 2

APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA

Na década de 1960, David Ausubel (1980, 2003) propôs a Teoria da Aprendizagem Significativa. Trata-se de uma teoria da psicologia do aprendizado. Uma aprendizagem diz-se significativa em oposição a uma aprendizagem memorística; na aprendizagem significativa, os conceitos adquirem significado, daí o nome.

Na teoria de Ausubel, a aprendizagem significativa dá-se pela interação entre o novo conhecimento e um conhecimento prévio. Nesse processo, o novo conhecimento adquire significados para o aprendiz e o conhecimento prévio fica mais rico, mais diferenciado, mais elaborado em termos de significados e adquire mais estabilidade. Segundo Ausubel, o conhecimento prévio é, isoladamente, a variável que mais influencia a aprendizagem, como ele mesmo enfatiza [2]:

Se tivesse que reduzir toda a psicologia educacional a um só princípio, diria o seguinte: o fator isolado mais importante influenciando a aprendizagem é aquilo que o aprendiz já sabe. Determine isso e ensine de acordo.

2.1 CONDIÇÕES PARA O APRENDIZADO

Na aprendizagem significativa, o aprendiz não é um receptor passivo. Ele deve fazer uso dos significados que já internalizou para poder captar os significados dos materiais educativos. Nesse processo, ao mesmo tempo que está progressivamente diferenciando sua estrutura cognitiva, está, também, fazendo a reconciliação integradora de modo a identificar semelhanças e diferenças e reorganizar seu conhecimento. Quer dizer, o aprendiz constrói seu conhecimento, produz seu conhecimento.

Esse esforço do aprendiz em conectar de maneira não arbitrária e não literal o novo conhecimento com a estrutura cognitiva existente é indispensável à aprendizagem significativa. É necessária uma atitude proativa, pois numa conexão, uma determinada informação liga-se a um conhecimento de teor correspondente na estrutura cognitiva do aprendiz; e em uma conexão não literal a aprendizagem da informação não depende das palavras específicas que foram usadas na recepção da informação[3].

Desse modo, podemos ter uma aprendizagem receptiva significativa em uma sala de aula convencional, onde se usa recursos tradicionais tais como giz e quadro negro, quando existir condições do aluno transformar significados lógicos de determinado conteúdo potencialmente significativo em significados psicológicos, em conhecimento construído e estruturado idiossincraticamente.

2.2 SUBSUNÇORES

Além da disposição do aprendiz, existem outros requisitos essenciais para a aprendizagem significativa: A oferta de um novo conhecimento estruturado de maneira lógica e a existência de conhecimentos na estrutura cognitiva que possibilite a sua conexão com o novo conhecimento. Entende-se, portanto, que a disponibilidade para o aprendizado implica em uma atitude explícita de apreender e conectar o seu conhecimento com aquele que pretende absorver.

Esses conhecimentos prévios pertinentes ao assunto a ser aprendido são, também, chamados de conceitos subsunçores ou conceitos âncora. Quando se dá a aprendizagem significativa, o aprendiz transforma o significado lógico do material pedagógico em significado psicológico, na medida que esse conteúdo se insere de modo peculiar na sua estrutura cognitiva e cada pessoa tem um modo específico de fazer essa inserção, o que torna essa atitude um processo idiossincrático[2].

Mas o que fazer quando não existem subsunçores disponíveis? A primeira atitude que se toma para acompanhar um curso nestas condições é ir memorizando as partes iniciais até que o seu conteúdo seja absorvido, incorporado meio na força, de modo abrupto, na concepção da aprendizagem mecânica apontada por Ausubel.

A aprendizagem mecânica ou memorística está em contraposição à aprendizagem significativa, em outro extremo de um contínuo, onde ocorre a absorção literal e não substantiva do novo material. O esforço necessário para esse tipo de aprendizagem é muito menor, daí ele ser

tão utilizado, quando os alunos se preparam para exames escolares. Principalmente aqueles exames que exigem respostas literais às suas perguntas, que não exijam do aluno uma capacidade de articulação entre os tópicos do conteúdo em questão. Apesar de custar menos esforço, a aprendizagem memorística é volátil, com um grau de retenção baixíssimo, na aprendizagem de médio e longo prazo.

Ausubel sugere o uso da aprendizagem mecânica, quando não existirem na estrutura cognitiva do aprendiz idéias-âncora (subsunçor) que facilite a conexão entre esta e a nova informação, quando não existirem idéias prévias que possibilitem essa ancoragem. Em uma dada circunstância, nos deparamos com a tarefa de aprender uma seqüência de determinados conteúdos, sem ter tido a oportunidade de algum conhecimento próximo. Ele sugere que o conhecimento inicial seja memorizado e, a partir desse conhecimento absorvido, seja paulatinamente estruturado o conhecimento sobre o tópico considerado[3].

2.3 ORGANIZADORES PRÉVIOS

Ausubel criou uma nova alternativa para a situação acima, ao propor a utilização de organizadores prévios. Eles são pontes cognitivas entre o que aprendiz já sabe e o que pretende saber. É construído com um elevado grau de abstração e inclusividade de modo a poder se apoiar nos pilares fundamentais da estrutura cognitiva do aprendiz e, desse modo, facilitar a apreensão de conhecimentos mais específicos com os quais ele está se deparando.

A implementação dos organizadores prévios se dá através de materiais introdutórios, apresentados antes do material de aprendizagem em si mesmo, para servir de ponte entre o que o aprendiz já sabe e o que deveria saber para que esse material fosse potencialmente significativo ou, mais importante, para mostrar a relacionabilidade do novo conhecimento com conhecimento prévio pertinente[3].

2.4 MAPAS CONCEITUAIS

De um modo geral, mapas conceituais ou mapas de conceitos são, apenas, diagramas indicando relações entre conceitos ou entre palavras que usamos para representar conceitos. Mapas conceituais podem seguir um modelo hierárquico, no qual conceitos mais inclusivos estão no topo da hierarquia (parte superior do mapa) e conceitos específicos, pouco abrangentes, estão na

base (parte inferior). A teoria que está por trás do mapeamento conceitual é a teoria cognitiva de aprendizagem de David Ausubel.

Trata-se de uma técnica desenvolvida em meados da década de 1970 por Joseph Novak e seus colaboradores, na Universidade de Cornell, nos Estados Unidos.

Os mapas conceituais podem promover a aprendizagem significativa, se adequadamente utilizados, uma vez que propiciam uma ênfase na estrutura e no papel dos sistemas conceituais no desenvolvimento de uma disciplina. No apêndice encontra-se um mapa conceitual de força.

Capítulo 3

PLANEJAMENTO E EXECUÇÃO

3.1 METODOLOGIA

O primeiro passo, após o delineamento do tema a ser abordado e dos fatores que levaram à sua escolha, é o planejamento e a preparação de um questionário a ser submetido aos alunos para levantamento de conhecimentos prévios. A partir dos conhecimentos prévios, uma ou várias aulas são preparadas, nas quais esse conhecimento é integrado ao assunto principal. Depois, o tema principal é ensinado, nos moldes usuais. Após, o mesmo questionário é repassado e as respostas comparadas com as respostas iniciais.

3.2 ESTRUTURA E APLICAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS

Os tópicos principais cobertos, foram:

1. A trajetória e as forças envolvidas no movimento dos planetas do Sistema Solar.
2. As grandezas vetoriais envolvidas em um movimento curvilíneo de um veículo.
3. O conceito de inércia no movimento retilíneo.
4. O efeito da velocidade na força centrípeta.

Para cada um desses tópicos foram elaboradas pelo menos duas questões, ficando o questionário final da seguinte forma:

Questão 1a: Qual a trajetória dos planetas?

Questão 1b: Qual a força responsável pela trajetória de um planeta ?

Questão 1c: Indique, na figura abaixo, a força sobre cada planeta:

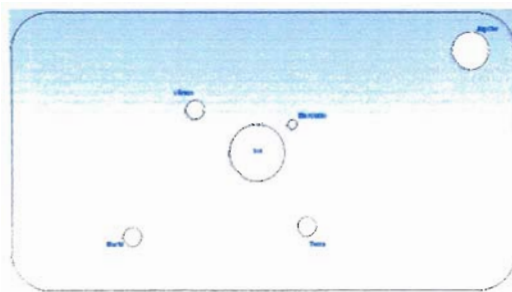


Figura 3.1: O desenho acima é apresentado no questionário para que o aluno represente as forças atuando em cada planeta.

Questão 2: Quando você está dentro de um veículo (carro, ônibus, metrô), fazendo uma curva para a direita, em que direção você é “empurrado”? Por que isso acontece?

Situação. Considere uma bola de boliche muito nova e lisa, lançada em uma pista bem longa e encerada:

Questão 3a: O que acontece, se a pista estiver no vácuo?

Questão 3b: O que acontece, se a pista estiver em um ambiente com ar?

Situação. Faça a seguinte experiência: Pegue um barbante e amarre uma borracha escolar em uma das extremidades. Segurando a outra extremidade com o dedo indicador e o polegar, comece a girar o barbante e o objeto no mesmo plano. Responda:

Questão 4a: O que você sente nos dedos, enquanto o barbante gira?

Questão 4b: Se o barbante for girado mais rapidamente, o que você sente (em comparação com a resposta da Questão 4a)?

Questão 4c: E se o barbante for girado mais vagarosamente, o que você sente (em comparação com a resposta da Questão 4a)?

Cabe, aqui, uma observação sobre as questões relacionadas ao último tópico. Estas questões foram elaboradas de uma forma inovadora em relação às questões tradicionais para levantamento de conhecimentos prévios: A idéia foi usar um experimento simples, que pudesse ser

rapidamente montado e executado em sala de aula, por todos os alunos da turma. Busca-se, dessa forma, o maior envolvimento possível do aluno com a questão, uma vez que cada um irá descrever algo inteiramente executado (e preparado) por ele, sem influência do professor.

Os questionários foram aplicados em três turmas da primeira série do Ensino Médio do Colégio Pedro II - Unidade Humaitá, uma escola da rede pública federal, localizada em um bairro de classe média, na zona Sul do Rio de Janeiro. Isto ocorreu alguns meses após o início das aulas, que seguiam o programa introdutório de Mecânica.

Houve uma resposta muito boa das três turmas no preenchimento dos questionário. Mesmo sabendo que a atividade não receberia uma nota, os alunos foram aplicados nas respostas, não tendo sido deixada nenhuma delas em branco. A execução do experimento certamente contribuiu muito no empenho dos alunos, além do fato de cada um ter recebido “de presente” um pequeno pedaço de barbante.

3.3 PROPOSTA DIDÁTICA

Esta etapa tem por objetivo a estruturação de material didático, composto de experimentos simples e textos relativos à História da Física, a serem utilizados no Ensino Médio, como agente motivador para o aprendizado do movimento circular.

Foram elaborados planos de aulas que buscam utilizar este material, de forma coerente com os Parâmetros Curriculares Nacionais[1]; segundo os PCN's, para que, de fato, possa haver uma apropriação dos conhecimentos de Física, as leis e princípios gerais precisam ser desenvolvidos passo a passo, a partir dos elementos práticos e vivenciais. Esse conhecimento deve estar, também, na medida do possível, contextualizado e integrado à vida de cada jovem, devendo-se apresentar uma Física que explique o comportamento da Natureza ao redor do estudante e não apenas para resolver exercícios [1]. No presente trabalho, isso foi feito através da abordagem do movimento circular, da queda dos corpos e o movimento dos astros no céu .

A utilização da História da Física também auxilia na [1],

percepção da mesma [História da Física] como atividade social humana, que emerge da cultura e leva à compreensão de que modelos explicativos não são únicos nem finais, tendo se sucedido ao longo dos tempos.

Capítulo 4

MATERIAL DIDÁTICO I: EXPERIMENTOS

Os experimentos detalhados a seguir foram apresentados em um trabalho exposto no V Encontro de Licenciatura em Física da UFRJ (ENLIF)[4]. Esse trabalho tinha como objetivo mostrar como dois experimentos didáticos podem auxiliar a estruturar o conceito de movimento circular, revelando a riqueza da dinâmica do círculo.

4.1 EXPERIMENTO 1: BORRACHA GIRATÓRIA

Objetivo. Esclarecer a existência da força centrípeta no movimento circular em uma plano.

Considerações gerais. Experimento simples, montado e executado pelo próprio aluno, na sala de aula, que busca esclarecer a existência da força centrípeta no movimento circular em uma plano. Pode ser montado e repetido pelo aluno, quantas vezes desejar, em qualquer lugar. Material utilizado.

1. 1 borracha escolar
2. Barbante fino de, aproximadamente, 40 cm de comprimento

Procedimento e análise experimental.

Montagem: Amarre o barbante no meio da borracha. O barbante precisa estar firme, mas caso permaneça uma pequena folga, não há problema, pois o atrito com a borracha impede que ela se solte.

Descrição: O experimento consiste em girar a borracha (figura 2), presa ao barbante, em velocidades diferentes, observando-se o que ocorre nos dedos que estão segurando o barbante e o que acontece com a borracha

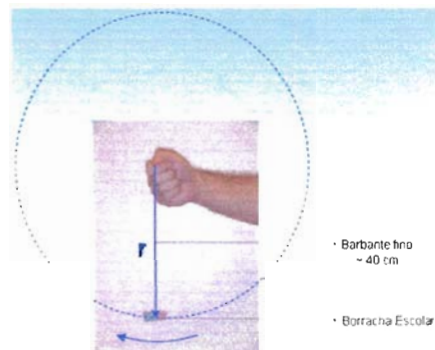


Figura 4.1: Experimento da borracha girante.

Questões conclusivas.

1. O que você sente nos dedos, enquanto o barbante gira?

Resposta: É necessário aplicar uma força ao barbante para que ele não escape da mão (apertar os dedos).

2. E se o barbante for girado mais rapidamente, o que você sente nos seus dedos (em comparação com a resposta do item 1)?

Resposta: É necessária uma força maior que a do item A, para o barbante não escapar da mão.

3. E se o barbante for girado mais vagorosamente, o que você sente nos seus dedos (em comparação com a resposta do item 1) ?

Resposta: Que a força necessária para manter o barbante na trajetória é menor que a do item 1, sendo possível notar que no ponto mais alto esta força é menor que no ponto mais baixo.

4.2 EXPERIMENTO 2: GARRAFA FLUTUADORA

Objetivo. Esclarecer a existência e a necessidade da força centrípeta, no movimento circular em um plano.

Considerações gerais. Experimento simples, montado e executado em sala de aula, que busca esclarecer a necessidade da força centrípeta, no movimento circular em uma plano, através da compensação de uma outra força (peso).

Material utilizado.

1. 1 garrafa plástica de 500 *ml*, com tampa
2. 1 fio de nylon de, aproximadamente, 2,5 *m* de comprimento
3. 1 embalagem plástica pequena (200 *ml*) de iogurte
4. 2 ou 3 folhas de jornal
5. 1 saco plástico pequeno de supermercado
6. Arame de embalagem de pão-de-forma
7. Água

Procedimento e análise experimental.

Montagem: Amasse duas folhas de jornal de forma bem compacta, molhando com um pouco de água, caso necessário. Coloque a paçoca dentro do saco plástico, amarrando-o firmemente com o arame e cortando o excesso de plástico. Amarre uma extremidade do fio de nylon no arame, passando-o pelo orifício do copo de iogurte, que pode ser feito com uma tesoura ou faca. Amarre esta outra extremidade do fio de nylon na boca da garrafa, enchendo-a com cerca de 300 *ml* de água.

Descrição: O experimento consiste em girar a bola de jornal em um plano sobre a cabeça, através do fio de nylon, que está amarrado à garrafa plástica. Isto é feito, segurando-se o conjunto pela embalagem de iogurte, que permitirá girar a bola, ao mesmo tempo que o fio de nylon suba ou desça pelo orifício.

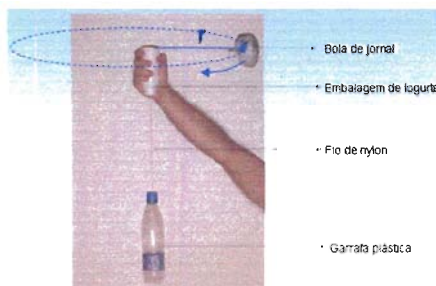


Figura 4.2: Experimento da garrafa flutuante.

Gratidão??

Questões conclusivas.

1. Por que a garrafa não cai?

Resposta: Porque a tensão T' no fio vertical (figura 4.2) — devida ao movimento circular da embalagem de iogurte — cancela o peso da garrafa. E, obviamente, a tensão permanece, enquanto houver o movimento circular da embalagem de iogurte ($m \frac{v^2}{r}$).

2. O que ocorre com o peso da garrafa?

Resposta: A tensão T' no fio, devida ao movimento circular da bola, é cancelada pelo peso da garrafa: $T' = mg$

3. O que acontece, se o movimento de rotação for interrompido? Por que?

Resposta: A garrafa vai cair, pois ao interromper o movimento circular, a tensão T deixa de existir, não havendo mais compensação do peso, que fará com que a garrafa desça.

4. O que ocorre quando a velocidade de rotação da bola aumentar?

Resposta: A tensão T é que mantém a bola girando na trajetória circular, sendo portanto igual a $m \frac{v^2}{r}$. Ao aumentar v , T' aumenta, tornando-se maior que o peso (que permanece fixo), fazendo com que a garrafa suba um pouco.

Capítulo 5

MATERIAL DIDÁTICO II: HISTÓRIA DA FÍSICA COMO ORGANIZADOR PRÉVIO

O uso da História da Física como organizador prévio segue as idéias apresentadas em [5]:

O pressuposto é que a História da Física é um excelente auxiliar no ensino de Física, mas que só é valiosa ao entendimento da ciência, na medida em que apresenta os problemas que levaram à formulação de um particular conceito e revela os ingredientes lógicos ou empíricos que foram realmente importantes nesse processo de criação intelectual. Busca-se na História da Física, o 'como' e o 'porque' um dado tema e seus conceitos pertinentes foram propostos: Esse tipo de História da Física mostra o que é preciso saber para fundamentar um tema e seus conceitos pertinentes. A ênfase em problemas, no modo como foram colocados e como vieram a ser solucionados é o diferencial que torna a História adequada como organizador prévio potencial.

Textos de História são, então, preparados, no qual conceitos subsunçores dos aprendizes dão seqüência à formação do conceito correto.

5.1 TEXTO 1: OBSERVANDO (PACIENTEMENTE) O MOVIMENTO DAS ESTRELAS

Em nossa época, a observação ou mesmo a simples contemplação do céu noturno deixou de ser uma atividade corriqueira e freqüente. Poucas pessoas passam seu tempo observando o céu.

à noite, e, quando o fazem, sua observação é obscurecida pelos edifícios e pelas luzes das ruas.

Na Antigüidade, não era assim: Olhar para as estrelas era uma parte importante do comportamento normal do homem [6] e os corpos celestes tinham uma função universal como medidores de tempo e calendários e orientação em viagens. Nessas circunstâncias, a capacidade de identificar estrelas com uma vista de olhos era relativamente comum. Os homens cujas ocupações lhes proporcionavam uma observação contínua no céu noturno haviam agrupado, mentalmente, as estrelas em constelações, grupos de estrelas vizinhas que podiam ser vistas ou reconhecidas como um padrão fixo (figura 5.1).



Figura 5.1: Constelação de Órion, o caçador, que inclui as "Três Marias".



Figura 5.2: Fotografia de longa exposição, mostrando as trajetórias das estrelas em torno do Pólo Sul. *crédito*

Essas constelações, entretanto, estavam sempre em movimento. Se observarmos o céu noturno, durante algum tempo, veremos as estrelas surgindo no Leste e desaparecendo no Oeste e, ainda, se olharmos diretamente para o Sul, veremos as estrelas percorrendo as trajetórias [6] mostradas na figura 5.2.

O movimento da estrela ocorre a uma razão superior a 15° por hora, sendo conhecido como movimento diurno das estrelas (embora só possa ser visto à noite).

Uma observação durante um período mais longo (alguns meses, por exemplo) revela um outro movimento dessas constelações. As estrelas que são visíveis e a porção do céu na qual elas aparecem dependem da data e da hora da observação [6]. Durante este tempo algumas constelações vão deixando de ser visíveis e outras vão surgindo vagarosamente.

Observações mais cuidadosas, realizadas ao longo de diversos meses e anos, revelaram que cinco estrelas se deslocam para leste em relação às constelações, em velocidades diferentes, voltando à mesma posição nos seguintes períodos de tempo mostrados na tabela abaixo:

Estrela móvel 1	= 88 dias
Estrela móvel 2	= 225 dias
Sol	= 365 dias
Estrela móvel 3	= 687 dias
Estrela móvel 4	= 12 anos
Estrela móvel 5	= 29 anos
Lua	= 28 dias

Figura 5.3: Tabela de peridiocidade dos movimentos dos “objetos celestes”.

5.1.1 ARISTÓTELES E O MOVIMENTO DAS ESTRELAS

O grande pensador grego Aristóteles viveu no século IV a.C. Ele procurou entender as observações feitas acima, fazendo uma distinção absoluta entre as regiões sublunares (abaixo da Lua) e supralunares (acima da Lua), com características totalmente diferentes entre si.

A região sublunar, na qual o homem vive, é a região da variedade e mudança, nascimento e morte, geração e corrupção. Por outro lado, a região celeste (supralunar) é eterna e inalterável. Na descrição física do universo de Aristóteles, o céu circundante é o local da perfeição e do poder de que a vida terrestre depende. Isto pode ser visto na seguinte passagem da obra “*Dos Céus*”, de Aristóteles (*apud* [6], p.113).

O primeiro corpo de todos [isto é, a matéria celeste] é eterno, não sofre aumentos nem diminuições, mas não tem idade. é inalterável e impassível. [...]

Todos os homens têm uma concepção dos deuses, e todos atribuem o lugar mais elevado ao divino, tanto bárbaros como Helenos, a maioria acredita em deuses. [...]

Se então – e é verdade – existe algo divino, o que dissemos sobre a substância corporal primária (nomeadamente a que é sem peso, indestrutível, inalterável, etc. está bem dito. [...]

Ao longo de todo o tempo passado, de acordo com os registros apontados de geração para geração, não encontramos vestígios de mudança nem no conjunto de do céu exterior nem em nenhuma de suas partes. [...]

Também parece que o nome deste primeiro corpo chegou até ao tempo presente através dos antigos. Assim eles, acreditando que o primeiro corpo era alguma coisa diferente da terra, do ar, do fogo e da água, deram o nome de éter à região superior, escolhendo o seu nome a partir do fato de que ele nunca pára e é eterno.

É possível entender, neste ponto, a grande importância atribuída ao movimento circular uniforme: Este era o movimento da região celeste, sendo, portanto, perfeito, sem falhas. A trajetória dos corpos celestes era um círculo perfeito, uma figura geométrica completamente simétrica, sem interrupções. Era ainda uniforme, imutável e eterno, ocorrendo da mesma forma ao longo do tempo, sem nenhum registro de mudanças pelos povos mais antigos. Era o movimento preferencial.

5.1.2 A BUSCA DA PERFEIÇÃO ATRAVÉS DO MOVIMENTO CIRCULAR: A EXPLICAÇÃO DAS TRAJETÓRIAS DOS CORPOS CELESTES

Foi visto no último texto, o importante papel do movimento circular na teoria que explicava as observações dos movimentos dos corpos celestes, servindo, inclusive, de delimitador para o mundo terrestre (sublunar).

O movimento circular era a base do “esquema” ou modelo para explicar os movimentos das estrelas móveis (planetas): Todos giravam em um círculo, em torno da Terra, a cada dia. Observando-os durante mais tempo (dias, meses e anos) observava-se que também se moviam em volta da Terra, em um movimento também circular porém mais vagaroso.

Este movimento só podia ser percebido comparando as posições dos planetas com as das estrelas fixas ao longo dos meses, anos e até mesmo décadas! De qualquer forma, todos esses movimentos eram muito bem representados através de trajetórias circulares no céu.

Observações mais cuidadosas revelaram que os movimentos dos corpos celestes apresentavam “anomalias”: As estrelas móveis (ou planetas) apresentavam, por um breve intervalo de tempo, uma irregularidade no seu movimento, deslocando-se momentaneamente para trás e voltando a se deslocar para frente (figura 5.4).

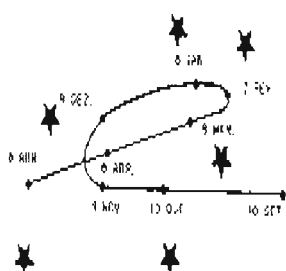


Figura 5.4: Movimento retrógrado de Marte.

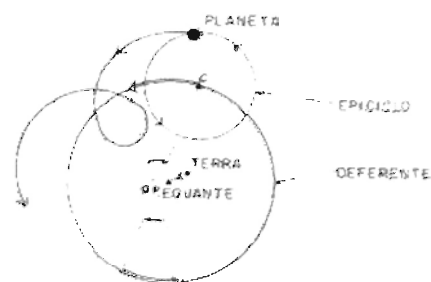


Figura 5.5: Representação simplificada do esquema utilizado por Ptolomeu.

O grande astrônomo grego Ptolomeu viveu no século II d.C. (400 anos depois de Aristóteles) e procurou elaborar um modelo mais detalhado para explicar esse comportamento. Mais uma vez, a base de todo o seu elaborado modelo foi o movimento circular! O princípio básico da Astronomia antiga era que os movimentos celestes deveriam ser explicados por composição de movimentos circulares uniformes.

Ptolomeu utilizou uma combinação complexa de círculos; na figura 5.5, o esquema é mostrado de forma simplificada, para apenas um planeta: A Terra está no centro, o círculo *deferente* gira uniformemente em torno dela; o planeta está em outro círculo, o *epiciclo*, cujo centro se move sobre o *deferente*; o *epiciclo* gira uniformemente ao redor do chamado *ponto equante* (figura 5.5). O modelo completo (para os planetas conhecidos na época) está na figura 5.6.

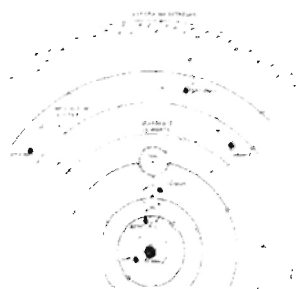


Figura 5.6: Modelo Ptolomaico.



Figura 5.7: Modelo Copernicano.

Esse modelo foi adotado por quase todos os astrônomos árabes; o primeiro autor europeu a descrever o sistema parece ter sido Michael Scot, em 1217, quase 1000 anos depois. Esses astrônomos que seguiram Ptolomeu o fizeram, porque o sistema “funcionava” e por não possuírem uma alternativa tão profundamente desenvolvida. Mesmo Nicolau Copérnico, famoso pela crítica à hipótese geocêntrica, no século XIV, atribui aos astros movimento circular uniforme, epiciclos e deferentes (figura 5.7). O grande pensador italiano, Galileu Galilei também não se liberta do círculo. Essa “doutrina do círculo” só é rompida pelo astrônomo alemão, contemporâneo de Galileu, Johannes Kepler.

5.2 TEXTO 2: O DESENVOLVIMENTO DA MECÂNICA

5.2.1 A “DINÂMICA” DE ARISTÓTELES

Quando citamos, anteriormente, as idéias de Aristóteles, de forma introdutória, vimos que era feita uma distinção absoluta entre as regiões sublunares (abaixo da Lua) e supralunares (acima da Lua). Não entramos em detalhes sobre o que ocorria na região sublunar, limitando-nos a mencionar que é onde o homem vive e cujas principais características seriam: Variedade e mudança, nascimento e morte, geração e corrupção ([6], p.113) (em oposição à região supralunar, perfeita e imutável).

Em sua concepção, havia quatro elementos básicos na região sublunar — *terra*, *água*, *ar* e *fogo*. A cada um destes elementos acima mencionados corresponderia um *lugar natural* e um *movimento natural*: Aos corpos *pesados*, o centro do Universo; à *água*, ao *ar* e ao *fogo*, respectivamente, esferas concêntricas com a Terra, com raios crescentes nessa ordem. Um corpo só poderia se mover, quando se encontrasse fora de seu *lugar natural*; portanto, a corpos *pesados* corresponderia um movimento natural em *linha reta para baixo*, em direção ao centro do Universo; os corpos *leves* (*fogo*) movimentar-se-iam em *linha reta para cima*, em direção à sua esfera; a *água*, quando na *terra*, movimentar-se-ia para *cima* e, quando no *ar*, para *baixo*; o *ar*, quando na *terra* ou na *água*, movimentar-se-ia para *cima*, mas, quando no *fogo*, para *baixo*. Quando se encontram em seu *lugar natural*, os corpos não se movem.

Aristóteles entendeu que corpos mais pesados caem mais rapidamente que corpos mais leves, sendo que essa rapidez seria proporcional ao “peso” do corpo e inversamente proporcional à “resistência”; esses conceitos, obviamente, não tinham o mesmo significado atual: “Peso” designa a simples “tendência natural” de queda, que difere, segundo Aristóteles, de corpo a corpo; “resistência” é um conceito suficientemente vago para incluir, em termos modernos, tanto uma resistência do meio, quanto a inércia dos corpos. Aristóteles não matematizava a natureza como fazemos, mas é comum atribuir aos seus ditos a seguinte “lei”: $v \propto \frac{W}{R}$, onde W é o “peso” e R , a resistência.

5.2.2 GALILEU E O MOVIMENTO DOS CORPOS

Essas concepções sofreram críticas ao longo da antigüidade greco-romana. Nos séculos XVI e XVII, uma crítica importante, que trouxe contribuições positivas à nascente ciência da Mecânica foi a do italiano Galileu Galilei.

Além das diversas descobertas na área do movimento dos corpos, ele parece ter sido o primeiro cientista a usar, em 1609, o telescópio para fins astronômicos [7].

Segundo o historiador da ciência I. Bernard Cohen, somente tomando em consideração os acontecimentos de 1609 na sua justa proporção, poder-se-á compreender os profundos efeitos destas descobertas na vida de Galileu e sua influência na história do pensamento científico. Acrescenta, ainda, que apenas nesta perspectiva é possível apreciar como veio acontecer a grande revolução na dinâmica que pode dizer-se marcar o início da Física moderna [7].

As descobertas de Galileu, feitas com o uso do telescópio, causaram grande perturbação nos homens de saber e talento, como poetas, cortesãos e pintores ([7], p.100), pois mostraram que os céus não eram imutáveis ou incorruptíveis. Sem aprofundar os detalhes de cada uma dessas descobertas, é possível citar algumas: Os quatro satélites girando ao redor de Júpiter, as fases de Vênus, as montanhas da Lua (chegando, inclusive a estimar a sua altura), as manchas solares, além de ter visto uma enorme quantidade de estrelas, incluindo as que formam a Via Láctea “examinada de forma tão direta e com tal certeza ocular que todas as discussões que tinham apoquentado os filósofos de todas as épocas foram resolvidas” ([7], p.89).

Estas descobertas fizeram com que a realidade do sistema copernicano já não fosse uma especulação infundada, na segunda década do século XVII ([7],p.107), tornando-se urgente solucionar os problemas de uma Física do movimento na Terra. Galileu dedicou considerável esforço intelectual a este problema, sendo os seus resultados a base da moderna ciência do movimento.

Em sua obra *Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências*, publicada em 1638, Galileu apresenta uma teoria matemática da queda livre que contraria a idéia de Aristóteles: Corpos pesados caem com velocidades idênticas [7]. Para resolver o problema da queda livre, Galileu usou o chamado Teorema da Velocidade Média, que já havia sido formulado por um grupo de pensadores do Colégio de Merton, da Universidade de Oxford, na Inglaterra, no século XIV. Segundo o teorema, a distância percorrida em um movimento uniformemente acelerado, no tempo t , é igual à distância percorrida, no mesmo tempo, em um movimento

uniforme, feito com a velocidade média do primeiro: $v_{\text{mov. unif.}} = \frac{v_{\text{inicial}} + v_{\text{final}}}{2}$

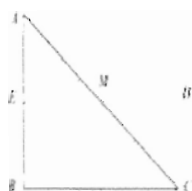


Figura 5.8: **Teorema da Velocidade Média.**

A área do triângulo AEM é igual à área do triângulo MDC , de modo que o triângulo ABC e o retângulo $BCDE$ têm a mesma área [9].



Figura 5.9: **Demonstração da Lei da Queda dos Corpos.** Pelo Teorema da Velocidade Média: $\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right) \times \left(\frac{t_1}{t_2}\right)$; por definição de movimento uniformemente acelerado: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{t_1}{t_2}$; logo: $\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2$. Segue-se um corolário: $\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2$ [9].

Galileu usou esse teorema para provar que, se um corpo se move com movimento uniformemente acelerado, as distâncias, s_1 e s_2 , percorridas, respectivamente, em tempos t_1 e t_2 obedecem à seguinte relação: $\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2$; em notação moderna: $s = \frac{1}{2}gt^2$. Como corolário, ele provou $\frac{s_1}{s_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2$; em notação moderna: $v^2 = 2gs$.

5.2.3 O PRINCÍPIO DA INÉRCIA

Em sua obra, *Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo: Ptolomaico & Copernicano*, publicada em 1632, Galileu formula a lei da inércia. Ele afirma com toda a clareza que, na ausência de forças, um corpo em movimento deve se manter indefinidamente em movimento. Seus argumentos são apresentados sob a forma de diálogos entre personagens por ele criados: Salviati representa o próprio Galileu; Simplicio representa a tradição aristotélica; Sagredo é o leigo inteligente, que, obviamente, vai ser convencido pelas idéias de Salviati ([8], p. 226-229):

Simplicio — Responderei o que souber e estou certo de que terei pouca dificuldade, porque das coisas que reputo falsas não acredito que possa saber algo, sendo que a ciência é das coisas verdadeiras e não, das falsas.

Salviati — Não desejo que digais ou respondais nada sobre a não ser aquelas coisas que seguramente sabeis. Por isso, digei-me: quando tivésseis uma superfície plana, polidíssima como um espelho e de matéria dura como o aço, e que não fosse paralela ao horizonte, mas um pouco inclinada, e sobre a qual se colocasse uma bola perfeitamente esférica e de matéria pesada e duríssima, como, por

exemplo, de bronze, deixada em liberdade, o que acreditais que ela faria? Não acreditais (assim como eu) que ela ficasse parada?

Simplício — Se aquela superfície fosse inclinada ?

Salviati — Sim, porque assim o supus.

Simplício — Não acredito de modo algum que ela ficasse parada; ao contrário, estou perfeitamente seguro de que ela se moveria espontaneamente na direção do declive.

Salviati — Prestai bastante atenção ao que dizeis, Sr. Simplício, porque estou certo de que ela ficaria parada em qualquer lugar que fosse colocada.

Simplício — Como vos servis, Sr. Salviati, dessa espécie de suposições, não me espantarei que obtenhais conclusões falsíssimas.

Salviati — Tendes mesmo toda a certeza de que ela se moveria espontaneamente na direção do declive?

Simplício — Que dúvida!

Salviati — E isto vós o tendes por certo, não porque eu vos tenha ensinado (porque eu procurava persuadir-vos do contrário), mas por vós mesmos e por vosso juízo natural.

Simplício — Agora entendo o vosso artifício; faláveis assim para tentar-me e (como vulgarmente se diz) para puxar-me o tapete, mas não porque acreditásseis verdadeiramente nisso.

Salviati — Assim é. E qual seria a duração do movimento daquela bola, e com que velocidade? Notai que me referi a uma bola perfeitissimamente redonda e a um plano perfeitamente polido, para remover todos os impedimentos externos e acidentais. E assim também quero que seja abstraído o impedimento do ar mediante a sua resistência a ser aberto, e todos os outros obstáculos acidentais, se outros pudessem existir.

Simplício — Compreendi tudo perfeitamente: quanto à vossa pergunta, respondo que ela continuaria a mover-se ao infinito, se tanto durasse a inclinação do plano, e com um movimento continuamente acelerado; porque tal é a natureza dos móveis graves, que *vires acquirant eundo*.¹

Salviati — Mas, se outros quisessem que aquela bola se movesse para cima sobre aquela mesma superfície, acreditais que ela subiria?

Simplício — Espontaneamente não, mas só arrastada ou lançada com violência.

Salviati — E quando ela fosse impelida por algum ímpeto que lhe fosse violentamente impresso, qual e quanto seria o seu movimento?

Simplício — O movimento iria sempre enfraquecendo e retardando-se, por ser contra a natureza, e seria mais demorado ou mais breve, segundo o maior ou o menor impulso e segundo o maior ou menor aclave.

¹E, quanto maior fosse a inclinação, maior seria a velocidade.

Salviati — Parece-me, portanto, até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas sobre o plano ascendente é necessário força para fazê-lo avançar e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais que em um e em outro caso nasce uma diferença dependendo de se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclive o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se uma distância maior quanto menor seja a elevação. Dizei-me agora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclive nem em declive.

Simplicio — Aqui preciso pensar um pouco na resposta. Como não existe declividade, não pode existir uma inclinação natural ao movimento e, não existindo aclividade, não pode existir resistência a ser movido, de modo que seria indiferente à propensão e à resistência ao movimento: parece-me, portanto, que ele deveria ficar naturalmente em repouso. Mas como sou esquecido! Porque não faz muito que o Sr. Sagredo me fez entender que assim aconteceria.

Salviati — Assim acredito, quando alguém o colocasse parado; mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?

Simplicio — Continuará a mover-se na direção daquela parte.

Salviati — Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?

Simplicio — Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.

Salviati — Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?

Simplicio — Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida, nem descida.

Salviati — Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja, perpétuo?

Simplicio — Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura.

5.2.4 DESCARTES E O MOVIMENTO CIRCULAR

O grande filósofo e matemático francês, René Descartes, deu contribuições importantes ao estudo do movimento dos corpos, em sua obra *Principia Philosophiæ*. Para compreender a sua argumentação, é preciso lembrar que, naquela época, as discussões sobre os assuntos, que hoje

classificamos como ciência, eram tratados como uma atividade relacionada à Filosofia, mais especificamente uma “Filosofia Natural”. No seu *Principia*, Descartes apresenta duas leis que, quando postas juntas, constituem o que se chama de “lei da inércia”:

1ª lei da natureza: Qualquer coisa tende a permanecer no estado que se encontra, desde que nada mude.

2ª lei da natureza: Todos os corpos que se movem, tendem a permanecer em seu movimento em linha reta.

A justificação dessas leis é metafísica. Para Descartes, a reta tem as simetrias que espelham a perfeição do criador ([10], p. 69). No caso do círculo, a direção da tangente muda de ponto a ponto e, para determinar o círculo, é preciso dar três de seus pontos; não é possível, portanto, dar o círculo “de uma só vez, no instante da Criação”. No caso da reta, a direção é fixa, portanto ela é inteiramente dada no instante da Criação; seus pontos não podem ser diferenciados (por exemplo, pela tangente, pois ela coincide com a reta) e cada ponto é idêntico ao “ponto inicial”.

Descartes discute a experiência de uma pedra que se faz girar em uma funda (análoga à experiência da borracha girante). Ele decompõe a velocidade uniforme com a qual uma pedra se move ao longo de uma linha reta, ao deixar uma funda, em duas componentes: Em linguagem moderna, a componente ao longo do raio vetor e a componente perpendicular a ele. O Movimento circular ocorre então, quando a componente radial é “impedida” (pela funda, por exemplo); portanto, Descartes chama a componente radial da velocidade (v_r) de componente “cujo efeito é impedido pela funda” e a componente tangencial (v_θ) de componente “cujo efeito não é impedido”. A seguir, ele compara a tendência da pedra de se afastar do centro do círculo com o “esforço” de uma esfera para se afastar, no seguinte experimento de pensamento: Um cilindro oco, infinito, gira em torno de uma de suas extremidades; dentro, uma esfera pode mover-se (sem atrito), ao longo do cilindro; à medida que o cilindro gira, a esfera move-se ao longo do cilindro, afastando-se do eixo de rotação; ora, isso pode ser feito, de modo que a esfera, à medida que se move, esteja sempre sobre uma reta (figura 5.10), tangente ao círculo em A .

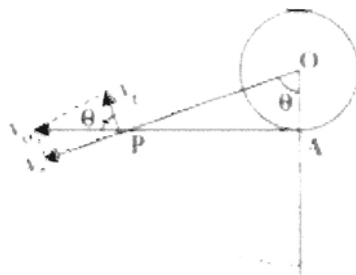


Figura 5.10: **As componentes do movimento circular (Descartes).** O corpo está em P , movendo com velocidade uniforme \vec{v}_0 : $\vec{v}_0 = \vec{v}_r + \vec{v}_\theta$. Se a componente \vec{v}_r for “impedida”, o corpo move-se em um círculo de raio OP [3].

5.2.5 A DINÂMICA DO MOVIMENTO CIRCULAR

Em 1687, Isaac Newton publicou seu livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (qualquer semelhança com o *Principia*, de Descartes, parece não ser mera coincidência [10]), no qual estabelece as categorias para o desenvolvimento de uma *Filosofia Natural* mecanicista — em que a Natureza é “explicada” por meio de matéria em movimento: As três leis da Mecânica, os conceitos de *força*, *massa*; além disso, ele dá um tratamento original às trajetórias curvas[5]. É nesta última categoria que surge a teoria de Newton para o movimento circular que se utiliza até hoje.

Em relação ao movimento circular, tanto Newton quanto o pensador holandês Christiaan Huygens, independentemente, procuraram uma expressão para a tendência que qualquer corpo tem de tensionar um fio a ele amarrado por uma ponta, quando uma pessoa gira o corpo, segurando a outra ponta do fio. Newton tem duas soluções (uma, de, talvez, 1664-1665 e a outra, de 1669), ambas anteriores à de Huygens, porém Huygens publicou seus resultados antes de Newton, em 1673, em *Horologium Oscillatorium*; a demonstração dos resultados, contudo, só foi publicada, postumamente, em 1703, em *De Vi Centrifuga*.

O modo como Huygens concebeu o problema é, conceitualmente, mais rico do que o de Newton. Huygens calculou a distância com que o corpo se afasta do centro pela linha que liga ao centro, o corpo que se afasta — portanto, o corpo está colocado sobre a tangente ao círculo que passa pelo ponto em que começa a se afastar. Ele mostra, como vemos na figura abaixo que, para distâncias x muito pequenas, em notação moderna, $x \approx \frac{1}{2} \frac{v^2}{R} t^2$ e cria a expressão “força

centrífuga” [5].

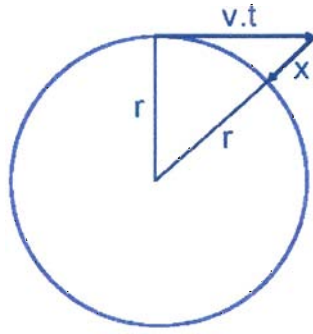


Figura 5.11: O círculo de raio r é percorrido com velocidade uniforme v em um tempo t . Pelo Teorema de Pitágoras: $(x + r)^2 = (vt)^2 + r^2$ ou $x^2 + (2r)x - (vt)^2 = 0$, de onde se tira $x = -r \pm r\sqrt{1 + \left(\frac{vt}{r}\right)^2}$. Nota-se que, se $y = \left(\frac{vt}{r}\right)^2$ for muito menor que 1: $\left(1 + \frac{y}{2}\right)^2 = 1 + y + \frac{y^2}{4} \approx 1 + y$, de modo que $\sqrt{1 + y} \approx 1 + \frac{y}{2}$; portanto (escolhendo o sinal + para ser $x \geq 0$), $x \approx -r + r\left[1 + \frac{1}{2}\left(\frac{vt}{r}\right)^2\right]$ e $x \approx \frac{1}{2}\left(\frac{v^2}{r}\right)t^2$

O método de conceber o problema indica que, para um corpo se manter em movimento circular, ele tem que “cair”, em cada instante, de volta para o círculo. E o faz com um movimento uniformemente acelerado (no caso do movimento circular uniforme), com aceleração $\frac{v^2}{R}$, denominada de *aceleração centrípeta*.

O entendimento de que esta seria uma força voltada para dentro e não para fora, entretanto, só foi desenvolvido por Newton. Após uma troca de correspondência com o célebre cientista inglês, Robert Hooke, Newton passou a utilizar um método para tratar trajetórias curvas, de autoria de Hooke. A idéia de Hooke consiste em separar um movimento em torno de um centro em duas componentes: uma componente inercial, responsável pelo movimento que o corpo teria, se continuasse a se mover com a velocidade instantânea, uniformemente (sem atuação de forças); um “soco” em direção ao centro, em torno do qual o corpo gira (isto é, o que nós chamaríamos de “impulso instantâneo”, radial, na direção do centro. As figuras 5.12 e 5.13 ilustram o método.

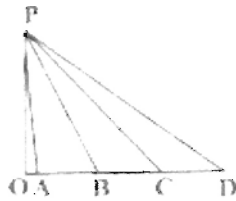


Figura 5.12: Movimento puramente inercial.

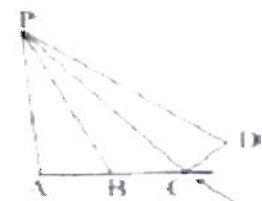


Figura 5.13: Início do movimento curvilíneo.

O corpo move-se, uniformemente, ao longo da linha reta horizontal; em intervalos de tempo iguais, o corpo terá, sucessivamente, as posições A , B , C , D . Esses pontos são ligados a um ponto P , acima do ponto O (origem), formando os triângulos PAB , PBC , PCD ; esses triângulos têm a mesma área, pois têm base de comprimentos iguais ($AB = BC = CD$) e mesma altura (PO). Suponha, agora (figura 5.14), que o corpo receba, em C , um “soco” (impulso instantâneo ou durando um tempo muito pequeno) na direção do ponto P ; após o impulso, o corpo se move em uma linha reta, mas em outra direção; após um intervalo de tempo igual aos anteriores, ele está em D (mas não necessariamente $CD = AB$ ou $CD = BC$; só o será, se o “soco” for perpendicular a CD , que é o caso do movimento circular). É possível mostrar, com pequeno trabalho, que as áreas dos triângulos ainda são iguais: área $PAB =$ área $PBC =$ área PCD .

Observação. Quem, por acaso, já ouviu falar da *Lei das áreas de Kepler*, relativa ao movimento dos planetas, e achou alguma semelhança com o raciocínio acima, está absolutamente certo. Esta é a demonstração que Newton apresenta logo no início de sua grande obra da *Lei das Áreas de Kepler* ([7], p. 202). E isso não era de se estranhar, uma vez que as trajetórias curvilíneas que estavam sendo estudadas eram justamente as dos planetas! É por isso que Newton pode ver que tem um centro para dirigir o “soco” — o Sol!

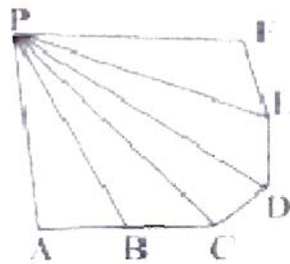


Figura 5.14: Lei das áreas.

Como se pode ver, o desenvolvimento da dinâmica do movimento circular de forma alguma foi algo imediato e fruto de “insight” de um cientista desocupado. Ao contrário, originou-se na reflexão e nos trabalhos das mentes mais competentes dos séculos XVI e XVII. Buscando solucionar diversos tipos de problemas relacionados ao movimento circular, esses pensadores contribuíram para a construção de uma teoria que descreve, com sucesso, desde as questões dos movimentos dos corpos na proximidade da superfície terrestre até a explicação matemática precisa das trajetórias dos planetas.

Capítulo 6

MATERIAL DIDÁTICO III: ATIVIDADES DE FIXAÇÃO

As atividades detalhadas a seguir foram planejadas para auxiliar na fixação de alguns conceitos que foram trabalhados tanto nos experimentos quanto nos textos históricos. A sequência de aplicação dessas atividades está descrita nos planos de aula (capítulo 7).

6.1 ATIVIDADE 1: OPERAÇÃO LARANJA NA CAMISA

Objetivo. Introduzir a questão da direção da velocidade no movimento circular, através de um exercício simples.

Considerações gerais. Atividade simples, executada em sala de aula, que leva o aluno a pensar sobre a direção que um corpo em movimento circular uniforme adquire, caso a força centrípeta seja interrompida. Isso é feito através de uma questão colocada em um contexto mais próximo ao do aluno do Ensino Médio do que o do tradicional exemplo da funda de “David e Golias”: Uma torcida de futebol.

O exercício também funciona como preparação para o experimento da borracha giratória, anteriormente descrito, uma vez que trata do mesmo tema.

6.1.1 Folha de Exercícios: Operação Laranja na Camisa

Vamos considerar uma determinada situação, batizada de "Operação Laranja na Camisa", que consiste no seguinte: Imagine um torcedor de futebol que deseja arremessar uma laranja na direção do campo que se encontra imediatamente à sua frente. Conhecendo bem a dinâmica do movimento circular (e também a história de David contra Golias), ele aproveita o momento em que os torcedores estão girando as camisas sobre suas cabeça para fazer mesmo. Na sua camisa, entretanto, ele acomoda uma laranja, que deverá atingir o campo em uma direção perpendicular ao mesmo.

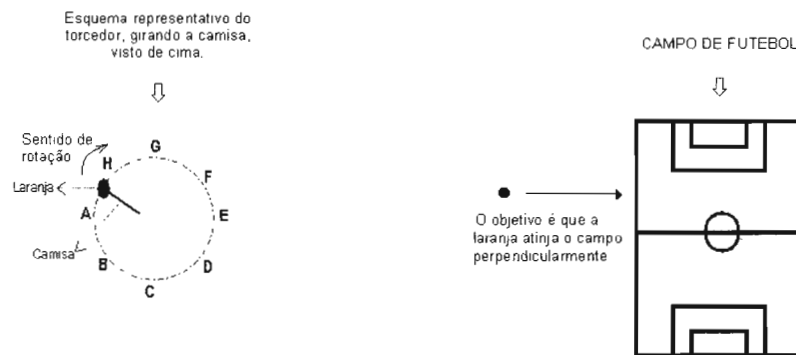


Figura 6.1: Representação esquemática da "Operação Laranja na Camisa".

Considerando que o torcedor precisa decidir em qual(is) do(s) 8 ponto(s) (A,B,C,D,E,F,G,H) mostrados na figura acima ele pode liberar a camisa de seu movimento circular, de forma que a laranja atinja o campo perpendicularmente, responda as três perguntas abaixo:

1. Em qual(is) ponto(s) o torcedor deve liberar a camisa para que a laranja atinja o campo perpendicularmente?
2. Faça um desenho em cima da figura, representando a velocidade da laranja no instante em que o torcedor libera a camisa, buscando atingir o campo, perpendicularmente.
3. Em qual(is) ponto(s) o torcedor deve liberar a camisa para que a laranja **não** atinja o campo perpendicularmente?

6.2 ATIVIDADE 2: ESTRELAS MÓVEIS

Objetivo. Ilustrar de forma simples a construção do modelo geostático para os planetas,

baseado no movimento circular uniforme.

Considerações gerais. Atividade simples, executada pelo próprio aluno, na sala de aula, após a demonstração da “Carta Celeste Giratória”¹ e da aplicação do texto “Observando o Movimento das Estrelas”.

No exercício, é solicitado que o aluno consulte a tabela com os períodos dos movimentos cíclicos observados, dos planetas, sobre o fundo de estrelas “fixas”, lembrando que esses dados foram levantados pelos astrônomos da antigüidade. Após a consulta, o aluno deve escrever a seqüência correta de “estrelas móveis” correspondentes aos círculos desenhados, onde já estão identificadas as trajetórias do Sol e da Lua, que servem como referência.

Além de mostrar a construção de um modelo, a atividade cria uma situação na qual as trajetórias dos planetas são mostradas de forma distinta do sistema heliostático, que é o conceito que a maioria traz do ensino fundamental.

6.2.1 Folha de Exercícios: Um modelo para explicar o caminho das estrelas móveis

Observe na primeira página do texto “Observando o movimento das estrelas”, a tabela que mostra o tempo que as “estrelas móveis”, o Sol e a Lua levam para completar seus ciclos. Lembre-se que esses dados foram levantados pelos astrônomos da antigüidade, que consideravam um esquema semelhante ao desenhado abaixo, com a Terra no centro.

1. Como seriam distribuídas essas estrelas no esquema a seguir? (Escreva ao lado de cada seta a estrela que você acha que deve corresponder à trajetória para qual a seta está apontando).
2. Essas “estrelas móveis” receberam nomes específicos, que ainda utilizamos hoje em dia. Procure lembrar-se desses nomes, que são muito usados em Astrologia (atividade não científica que trata de horóscopos, mapas astrais, etc e que não deve ser confundida com Astronomia!!!).
3. Na questão 2, ao relacionar os nomes usuais para as estrelas móveis acima, você deve ter notado que existem mais desses nomes que “estrelas móveis” mostradas no esquema acima. Por que isso ocorre(utilize a próxima página, caso necessário)?

¹Distribuída em sala, na segunda aula (próximo capítulo). Não é apresentada na presente monografia.

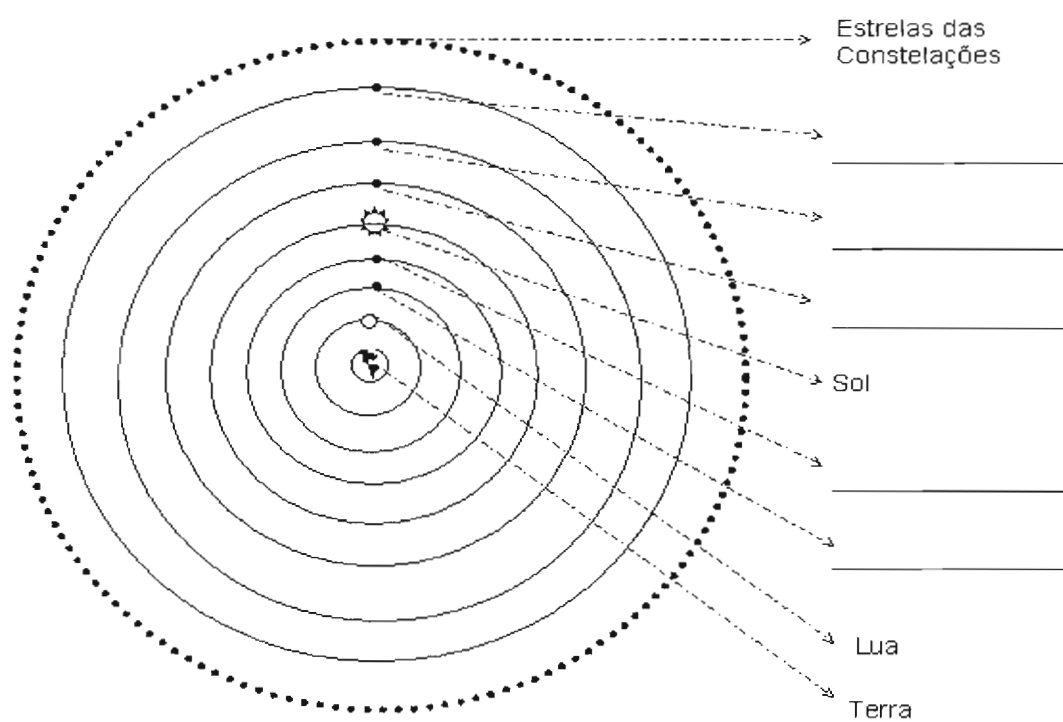


Figura 6.2: Modelo com as trajetórias das “estrelas móveis”.

Capítulo 7

PLANOS DE AULA

Os planos de aula, abaixo, foram aplicados em três turmas da primeira série do Ensino Médio do Colégio Peedro II - Unidade Humaitá. O pré-requisito era que as turmas tivessem os conceitos introdutórios de Mecânica, conforme os pressupostos conceituais necessários, listados para cada aula. A aplicação foi feita em conjunto com o professor Octávio, responsável pelas turmas e coordenador de Física da Unidade Humaitá.

7.1 PRIMEIRA AULA

Tema: O movimento circular no cotidiano

Pressupostos Conceituais Necessários

1. Compreensão das características básicas da geometria do círculo: raio e diâmetro
2. Noções básicas de cinemática
 - (a) Partícula
 - (b) Espaço
 - (c) Tempo
 - (d) Grandezas Escalares x Grandezas Vetoriais
 - (e) Velocidade
 - (f) Aceleração

Objetivos. Ao final da aula o aluno deverá estar apto a:

1. Identificar o movimento circular em situações do seu cotidiano
2. Diferenciar movimento circular uniforme do uniformemente variado, fazendo analogia com o movimento retilíneo.
3. Preparar e executar o experimento da “Borracha Girante”

Atividades.

1. Introdução ao novo assunto (5 min)
 - (a) Perguntas sobre exemplos de movimento circular
 - (b) Listagem no quadro
2. Desenvolvimento inicial da teoria a partir dos exemplos (10 min)
 - (a) Agrupamento dos exemplos em corpos rígidos e partículas
 - (b) Revisão dos conceitos básicos de cinemática vetorial
3. Atividade: Explicação e execução do exercício *Lançamento da Laranja* (15 min)
 - (a) Distribuição e explicação do exercício
 - (b) Execução do exercício
 - (c) Comentários e discussão sobre o exercício
 - (d) Breve explicação sobre a relação entre o exercício e o experimento da borracha
4. Execução do experimento *Borracha Girante* (15 min)
 - (a) Explicação do procedimento
 - (b) Distribuição dos barbantes, das perguntas conclusivas e auxílio nas “montagens”
 - (c) Orientação na execução do experimento e preenchimento das respostas

Conclusão (5 min)

1. Principais aspectos do conteúdo abordado
 - (a) Exemplos de movimento circular
 - (b) Rotação de corpos rígidos X rotação da partícula

- (c) As diversas interpretações do que ocorreu durante o exercício e o experimento.
- 2. Preparação para a próxima aula
 - (a) Distribuição e recomendação da leitura do texto *Observando o Movimento das Estrelas*
 - (b) Trazer um resumo escrito das principais idéias do texto

Material Necessário

- 1. Quadro Negro
- 2. Texto: *Observando o Movimento das Estrelas*
- 3. Barbantes
- 4. Borracha escolar (dos próprios alunos)

7.2 SEGUNDA AULA

Tema: Os astros e o movimento circular

Pressupostos Conceituais Necessários

- 1. Compreensão dos principais movimentos da Terra
- 2. Noções básicas dos movimentos dos planetas do sistema solar

Objetivos. Ao final da aula o aluno deverá estar apto a:

- 1. Compreender o processo de desenvolvimento de modelos para explicação do movimento aparente dos astros
- 2. Relacionar a busca pela explicação das trajetórias dos corpos celestes com o movimento circular uniforme
- 3. Ser capaz de reconhecer o modelo aceito atualmente e compará-lo com os modelos que utilizavam o movimento circular uniforme

Atividades.

1. Introdução ao novo assunto (5 min)
 - (a) Perguntas gerais sobre a observação dos astros na época atual
 - (b) Discussão sobre as características e a importância da observação dos astros na antiguidade
 - (c) Demonstração da carta celeste giratória [11]
2. Visão geral do texto *Observando o Movimento das Estrelas* (5 min)
 - (a) Leitura do resumo das principais idéias do texto
 - (b) Listagem e breve discussão das principais idéias gerais do texto
3. Atividade: *Modelo para explicar as estrelas móveis* (15 min)
 - (a) Distribuição e explanação do exercício *Modelo para explicar as estrelas móveis*
 - (b) Execução do exercício
 - (c) Comentários e discussão sobre o exercício (ressaltar o movimento circular uniforme)
 - (d) Explanação sobre o modelo de Aristóteles para explicação da trajetória das estrelas móveis
4. Outros modelos para explicação da trajetória das estrelas móveis (20 min)
 - (a) A questão do movimento retrógrado
 - (b) A necessidade de novos modelos para tratar novas observações
 - (c) Os modelos baseados no movimento circular uniforme: Ptolomeu e Copérnico
 - (d) O modelo aceito atualmente: Kepler

Conclusão (5 min)

1. Principais aspectos do conteúdo abordado
 - (a) Modelos explicativos dos movimentos dos astros
 - (b) A relação dos modelos com o movimento circular uniforme
2. Preparação para a próxima aula

- (a) Distribuição e recomendação da leitura do texto *O Desenvolvimento da Mecânica*
- (b) Trazer um resumo escrito das principais idéias do texto

Material Necessário

1. Quadro Negro
2. Texto: *Observando o Movimento das Estrelas*
3. Texto: *O Desenvolvimento da Mecânica*
4. Carta Celeste do Brasil

7.3 TERCEIRA AULA

Tema: O Desenvolvimento da dinâmica do movimento circular

Pressupostos Conceituais Necessários

1. Compreensão da relação entre os modelos astronômicos e o movimento circular
2. Noções básicas de dinâmica
 - (a) Força
 - (b) Massa
 - (c) Velocidade vetorial
 - (d) Aceleração vetorial

Objetivos. Ao final da aula o aluno deverá estar apto a:

1. Compreender como se desenvolveram os conceitos da dinâmica do movimento circular uniforme
2. Identificar a variação da velocidade no movimento circular uniforme (ou seja, que o M.C.U. é um movimento acelerado)
3. Entender como foi obtida a expressão $\frac{v^2}{R}$ com base na idéia de que, no M.C.U., o corpo se comporta como estivesse caindo em direção ao centro, em cada instante

Atividades.

1. A “dinâmica” de Aristóteles (5 *min*)
 - (a) As regiões “sublunar” e “supralunar”
 - (b) Os quatro elementos da região “sublunar”
 - (c) Movimento “natural” e “violento”
2. Galileu e o movimento dos corpos (10 *min*)
 - (a) Corpos em queda livre — Teorema da Velocidade Média
 - (b) O princípio da inércia, segundo Galileu
3. Descartes e a inércia no movimento circular (5 *min*)
 - (a) A “lei da inércia”, segundo Descartes
 - (b) As componentes do movimento circular segundo Descartes
 - (c) A analogia com o experimento da Borracha Girante
4. Isaac Newton, Christiaan Huygens e a dinâmica do movimento circular (15 *min*)
 - (a) Huygens e a expressão $\frac{v^2}{R}$
 - (b) A direcção da força no movimento circular
 - (c) O método de Hooke para tratar movimentos curvilíneos
 - (d) O método de Hooke e a Lei das Áreas de Kepler
5. Demonstração do experimento da Garrafa Flutuadora (10 *min*)
 - (a) Apresentação do desafio (como fazer a garrafa flutuar sem segurar o fio?)
 - (b) Execução do experimento
 - (c) Explanação do experimento utilizando os conceitos da dinâmica do M.C.U.

Conclusão (5 *min*)

1. Principais aspectos do conteúdo abordado
 - (a) As diversas contribuições para a dinâmica do movimento circular

- (b) O papel da força centrípeta no M.C.U.(peso da garrafa)
- 2. Obtenção da expressão $\frac{v^2}{R}$ Tópicos para aprofundamento posterior
 - (a) Movimento circular e Gravitação Universal
 - (b) As curvas cônicas e as trajetórias dos corpos celestes

Material Necessário

- 1. Quadro Negro
- 2. Texto: *O Desenvolvimento da Mecânica*
- 3. Garrafa plástica com 500 ml de água
- 4. Fio de nylon de aproximadamente 2, 5m de comprimento
- 5. Embalagem plástica pequena (200 ml) de iogurte
- 6. Bola de jornal

Capítulo 8

RESULTADOS

Os questionários de levantamento de conhecimentos prévios foram submetidos aos alunos dois meses antes da aplicação do material didático; esses resultados estão apresentados nas colunas identificadas com o título *antes*. Nesse período, eles tiveram uma introdução às Leis de Newton e um primeiro contato com o movimento circular, sem, no entanto, nenhuma referência aos movimentos planetários ou à gravitação. A idéia geral desses questionários é buscar conhecer as representações utilizadas pelos alunos [12] para algumas situações da realidade, que envolvem conceitos relacionados com o movimento circular, tais como tendência centrífuga, inércia e a relação entre o módulo da velocidade e o raio da trajetória. Os questionários foram, então, submetidos novamente aos alunos e esses resultados são apresentados nas colunas identificadas com o título *depois*.

8.1 RESPOSTAS DOS QUESTIONÁRIOS

Tabela 8.1: QUESTÃO 1a: Qual a trajetória dos planetas?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
elíptica	7	70	19	76	0	39
circular	17	24	41	21	31	43
giram em torno do Sol	67	0	22	0	35	18
não sabe	10	6	19	3	35	0

Tabela 8.2: QUESTÃO 1b: Qual a força responsável pela trajetória de um planeta ?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
força Gravitacional/gravidade	57	45	31	62	80	89
força centrípeta	0	55	0	36	0	7
não sabe	43	0	69	2	20	4

Tabela 8.3: QUESTÃO 1c: Indique, na figura abaixo, a força sobre cada planeta

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
força voltada para o Sol	13	70	3	74	23	75
força voltada para o Sol e reação no Sol	0	0	0	18	0	11
não sabe	87	30	97	9	77	14

Tabela 8.4: QUESTÃO 2: Quando você está dentro de um veículo (carro, ônibus, metrô), fazendo uma curva para a direita, em que direção você é “empurrado”? Por que isso acontece?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
esquerda — inércia	13	70	0	59	15	83
esquerda	70	15	75	32	58	17
direita	17	12	16	9	8	0
não sabe	0	3	9	0	19	0

Tabela 8.5: QUESTÃO 3a: O que acontece, se a pista estiver no vácuo?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
a bola não pára nunca; mantém seu mov. com velocidade constante	17	94	19	51	15	79
a bola anda mais rápido	13	6	9	3	19	21
não sabe	70	0	72	47	66	0

Tabela 8.6: QUESTÃO 3b: O que acontece, se a pista estiver em um ambiente com ar?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
a bola pára depois de um certo tempo, por causa da resistência do ar	13	88	6	45	4	50
a bola rola mais devagar; perde velocidade	0	0	19	18	30	39
não sabe	87	12	75	37	66	11

Tabela 8.7: QUESTÃO 4a: O que você sente nos dedos, enquanto o barbante gira?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
uma força puxando para fora	10	61	0	29	0	22
uma força	0	0	25	41	27	64
uma pressão	1	0	0	15	23	7
um atrito do barbante com o dedo	23	24	19	9	35	7
não sabe	54	15	56	6	15	0

Tabela 8.8: QUESTÃO 4b: Se o barbante for girado mais rapidamente, o que você sente nos seus dedos?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
uma força maior	6	70	0	56	42	72
uma pressão maior	13	0	0	15	12	14
uma diminuição no peso da borracha	7	12	6	9	0	0
não sabe	74	18	94	20	46	14

Tabela 8.9: QUESTÃO 4c: E, se o barbante for girado mais devagar, o que você sente nos seus dedos?

Resposta	Turma1101 (%)		Turma1103 (%)		Turma2104 (%)	
	antes	depois	antes	depois	antes	depois
uma força menor	0	46	22	50	34	75
uma pressão menor	17	6	0	9	0	11
atrito menor	13	24	19	15	0	11
não sabe	70	24	59	26	66	3

8.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A resposta das turmas às explicações e atividades foi muito boa, propiciando o envolvimento da grande maioria dos estudantes nos assuntos tratados. Entre os fatores que contribuíram para isso estão: A abordagem histórica do tema, distinta da tradicional (aprovada nas três turmas); os experimentos e demonstrações, com um especial (e inesperado) interesse na carta celeste giratória; o envolvimento e acompanhamento do professor responsável pela turma, que esteve presente e participando de todas as etapas do processo.

Entre as aplicações inicial e final dos relatórios houve um intervalo de, aproximadamente 1 mês e meio (com interrupções); nesse ínterim, os alunos foram introduzidos às Leis de Newton e ao movimento circular. Isso contribuiu, principalmente, para a utilização de uma terminologia mais precisa nas respostas. É interessante notar, entretanto, que houve um aumento significativo no percentual de acerto, também, das questões iniciais (1a, 2a e 3a), que estavam mais fortemente relacionadas com temas que só haviam sido tratados nas aulas de História, tais como: Trajetória dos planetas, a causa de seu movimento e a representação das forças atuando neles.

Cabe aqui, apontar alguns aspectos interessantes no retorno dos alunos ao tema *Observando o Movimento das Estrelas*:

1. Houve um envolvimento dos alunos com o tópico sobre a evolução dos modelos para explicação do movimento dos astros, ilustrado com a carta celeste giratória.
2. Esse envolvimento parece ter propiciado o entendimento do papel central do M.C.U. no desenvolvimento dos modelos, ao mesmo tempo que permitiu a visão geral do processo que culminou com as trajetórias elípticas (círculo como um caso especial). Isso pode ser observado no aumento significativo do percentual de acerto nas respostas à questão 1a: A resposta “trajetórias elípticas” teve um aumento significativo, sendo que a resposta “trajetórias circulares” continuou presente, com percentual crescente em duas turmas.
3. O aumento do percentual de acerto nas respostas 1b e 1c também reforça o entendimento dos modelos para a explicação dos movimentos dos planetas e das suas causas.
4. Na questão 1c, é possível notar uma evolução considerável na representação correta das forças, especialmente pelo fato de solicitar ao aluno um desenho, que permite uma melhor

avaliação do entendimento do conceito, mesmo que a Lei da Gravitação Universal não tivesse sido (explicitamente) abordada.

A evolução do entendimento do conceito de inércia é ilustrada nas questões seguintes (2, 3a e 3b). A melhora no percentual de acertos da questão 3a já era, de certa forma, esperada, devido à ênfase dada, na segunda parte, à discussão sobre inércia, no texto de Galileu. O fato de ser uma passagem totalmente original, apresentada em forma de diálogo parece ter tornado o conceito mais interessante que o enunciado tradicional.

Na questão 2, nota-se um aumento da utilização do termo “inércia” como justificativa para explicar porque o passageiro é empurrado para a esquerda. É interessante notar que, em duas turmas a surgiu seguinte resposta, conceitualmente mais elaborada: “Esquerda, pois nosso corpo tende a permanecer em sua trajetória”. A melhor compreensão do conceito é verificada, também, nas respostas da terceira questão, onde os alunos perceberam a diferença do ambiente no vácuo (“a bola não pára”) e com ar (“diminui a velocidade até parar”).

A resposta à pergunta “O que você sente nos dedos” foi a descrição desta força como um puxão para fora. Isso, provavelmente, ocorreu em função da sensação experimentada pelo próprio aluno ao girar a borracha, reforçada pela explanação de como o conceito de força no movimento circular se desenvolveu, evoluindo a partir da noção de uma tendência centrífuga (até a força centrípeta).

Finalmente, a (re)interpretação do experimento da borracha mostrou a percepção mais clara da relação entre força e velocidade no movimento circular. A demonstração da garrafa, acompanhada da dedução da expressão $\frac{v^2}{r}$ certamente contribuiu para este entendimento. Isso porque, uma vez explicado o “enigma” da flutuação da garrafa, foi mostrado como o raio do círculo se comportava, qualitativamente, quando se alterava a velocidade (enquanto a garrafa subir ou descer) do movimento.

É possível, portanto, perceber que a utilização coordenada de material instrucional (baseado na História) e experimentos escolhidos criteriosamente podem fornecer um importante meio de estruturar conceitos em mecânica que, de outra forma, permanecem obscuros, como se fossem gerados por magia [9].

APÊNDICE: MAPA CONCEITUAL

Abaixo, um mapa conceitual com foco no conceito de força, relacionando-o com outros elementos da dinâmica como massa, aceleração, velocidade e referenciais. É importante ressaltar que não existe uma maneira única de se mostrar uma hierarquia conceitual em um diagrama deste tipo [2].

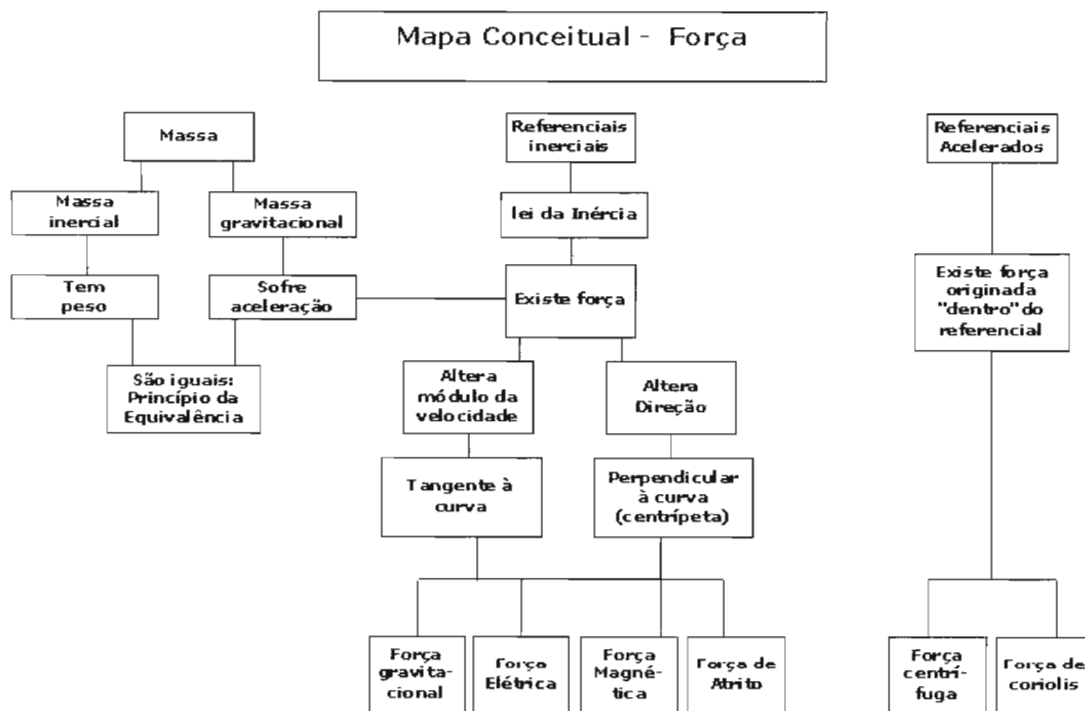


Figura 8.1: Mapa conceitual.

REFERÊNCIAS

- [1] Menezes, L.C. (coordenador); *Parâmetros Curriculares Nacionais. Parte III — Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias*, CNE, 1998.
- [2] Moreira, M.A.; *Uma Abordagem Cognitivista ao Ensino de Física*, Editora da Universidade, Porto Alegre, 1983.
- [3] Moreira, M.A.; *Aprendizagem significativa crítica*, Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Lisboa, 2000.
- [4] Benevides, R.C.S.; Dias, P.M.C.; Santos, W.S.; *Experimentos sobre movimento circular em um plano*, apresentado no V Encontro de Licenciatura do Instituto de Física da UFRJ, 2005.
- [5] Dias, P.M.C.; Santos, W.S.; Souza, M.T.M.; *A Gravitação Universal (Um texto para o Ensino Médio)*, Revista Brasileira de Ensino de Física, **26**, 2004, 257-271.
- [6] Kuhn, T.S.; *A Revolução Copernicana - A Astronomia Planetária no Desenvolvimento do Pensamento Ocidental*, Edições 70 Ltda. Traduzido por Fontes, M.C., 1990.
- [7] Cohen, I. Bernard; *O Nascimento de uma Nova Física*, Gradiva Publicações, 1988.
- [8] Galilei, G.; *Diálogo sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano*. Traduzido por Mariconda, P.R., Discurso Editorial, 2001.
- [9] Dias, P.M.C.; *$F=ma?!!$ O nascimento da lei dinâmica*, Revista Brasileira de Ensino de Física, **28**, 2006, 205-234.
- [10] Dias, P.M.C.; *O Desafio do círculo: Descartes e o 'Demônio da Desilusão'*, in: Saul Fuks (editor), *Descartes: um legado Científico e Filosófico*, Relume Dumará, 1997.
- [11] Mourão, R.R.F.; *Carta Celeste do Brasil*, Francisco Alves, 1990.
- [12] Grings, E.T.O.; Caballero, C.; Moreira, M.A.; *Possíveis indicadores de invariantes operatórios apresentados por estudantes em conceitos da termodinâmica*, Revista Brasileira de Ensino de Física, **28**, 2006, 463-471.